

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

# **BIGTAC-ILMATAISTELUSIMULOINTI HÄIVETEKNIIKAN HYÖTYJEN TUTKIMISESSA**

EUK:n tutkielma

Kapteeni

Ilkka Kuusniemi

Esiupseerikurssi 66

Ilmasotalinja

Huhtikuu 2014

# MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Esiupseerikurssi 66	Linja Ilmasotalinja
Tekijä Kapteeni Ilkka Kuusniemi	
Tutkielman nimi BigTac-ilmataistelusimulointi häivetekniikan hyötyjen tutkimisessa	
Oppiaine, johon työ liittyy Operaatiotaito ja taktiikka	Säilytyspaikka MPKK:n kurssikirjasto
Aika: Huhtikuu 2014	Tekstisivuja 24 Liitesivuja 0
<p><b>TIIVISTELMÄ</b></p> <p>Ilmavoimat pohtii uuden hävittäjäkaluston ostamista 2020-luvulla poistuvan F-18 Hornetin tilalle. Uusien hävittäjien kasvaneet hankintahinnat herättävät keskustelua niiden Stealth- eli häiveominaisuuksien välttämättömyydestä. Vastakkain asettuvat häivetekniikan tuottama operatiivinen suorituskyyky ja suorituskyyvyn hinta.</p> <p>Häivetekniikan tuomista mahdollisuuksista ei ole riittävän perusteltua tietoa. Tutkielman tavoitteena on luoda perusta häivetekniikan kustannustehokkuuden tarkastelulle taktiikan näkökulmasta. Tulevien hankintakustannusten tarkastelun perustaksi tarvitaan tietoa siitä, miten BigTac-simulointia voidaan käyttää ilmasotataktiikan tutkimisen työkaluna määritelyssä skenaariossa, jossa käytetään häivetekniikkaa. Tämän kysymyksen vastauksena on tarkoitus tuottaa ohjeistus, jonka perusteella häivetekniikan tuomia hyötyjä voidaan tutkia BigTac-simuloinnilla.</p> <p>Tässä tutkielmassa tarkastellaan kohteen tutkapoikkipinta-alan vaikutusta uhkajärjestelmien tutkien havaintoetäisyyteen sekä ammuntaetäisyyteen. Tutkielmassa testataan kokein tutkayhtälön ilmenemistä BigTac-simulaatiossa muutettaessa kohteen tutkapoikkipinta-alaa, ja uhkajärjestelmän päätöksentekotäisyyden muutosta vaihdettaessa kohteen tutkapoikkipinta-alaa. Näiden kokeiden jälkeen suoritetaan skenaariotarkastelu kahdella eri tutkapoikkipinta-alalla. Ilmasotataktiikan onnistumisen mittaamiseksi skenaariossa mitataan kolmea ominaisuutta, lentoturvallisuutta, selviytymistä ja tehtävän toteutumista. Eri tutkapoikkipinta-aloilla saatuja tuloksia vertaillaan erojen löytämiseksi.</p> <p>Ensimmäisen kokeen tuloksen perusteella ensimmäinen hypoteesi todettiin vääräksi. Hypoteesissa ilmakehän vaimennus määriteltiin läpäisykerroinvakioksi. Kun läpäisykerroinvakio muutettiin eksponentiaalisesti kasvavaksi vaimennukseksi, tutkayhtälö toteutui BigTac-simulaatiossa. Toisen kokeen tuloksen perusteella toinen hypoteesi osoitettiin todeksi. Uhka ampui aina samalla viiveellä kohteen havaitsemisen jälkeen. Viive esiintyi riippumatta siitä miltä etäisyydeltä uhkan tutka havaitsi kohteen. Kahden kokeen perusteella todettiin, että kohteen tutkapoikkipinta-ala vaikutti oletetusti uhkajärjestelmän tutkan havaintoetäisyyteen ja ammuntaetäisyyteen.</p> <p>Tutkielman skenaariossa tutkapoikkipinta-alan pienentäminen vaikutti ainoastaan kohteiden selviytymiseen. BigTac ei sellaisenaan tarjoa työkalua häivetekniselle tarkastelulle. Jotta tutkimuksesta saadaan vertailukelpoisia tuloksia, on käytettävä asiantuntijaa skenaarion alustuksen ja kohteiden toimintatapojen muokkaamiseksi. Skenaarion perusteella esitettiin ohjeistus BigTacin käyttöohjeeksi tuleville tutkimuksille.</p>	
<p><b>AVAINSANAT</b></p> <p>Ilmasota, tutkat, häivetekniikka, tutkakaikupinta, taktiikka, simulointi, hävittäjät (ilmakulku-neuvot), ilmaoperaatiot</p>	

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Häivetekniikan tutkimuksen perusta .....	1
1.2	Simulointi häivetekniikan hyötyjen tarkastelussa .....	3
1.3	Simulaatioiden analysoiminen .....	4
1.4	Simulointi sotilaallisten ongelmien ratkomisessa .....	5
1.5	Taktiikan analysointi osatekijöiden tuloksilla .....	6
1.6	Häivetekniikka simulaatiossa .....	7
<b>2</b>	<b>PISTEMÄISEN TUTKAPOIKKIPINTA-ALAN KOHTEEN HÄIVETEKNINEN TARKASTELU BIGTAC-ILMATAISTELUSIMULAATIOSSA .....</b>	<b>11</b>
2.1	Havaintoetäisyys .....	11
2.2	Ammuntaetäisyys .....	12
2.3	Tulokset .....	13
<b>3</b>	<b>HÄIVETEKNINEN SKENAARIOTARKASTELU BIGTAC:SSÄ .....</b>	<b>15</b>
3.1	Ilmataisteluskenaario .....	15
3.2	Tulokset .....	17
<b>4</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>19</b>
4.1	BigTac-skenaarioasetukset häivetekniikan hyötyjen tutkimisessa.....	19
4.2	Tehtävärakenteen osatekijöiden määrittäminen .....	20
<b>5</b>	<b>POHDINTA .....</b>	<b>22</b>

# **BIGTAC-ILMATAISTELUSIMULOINTI HÄIVETEKNIIKAN HYÖTYJEN TUTKIMISESSA**

## **1 JOHDANTO**

Ilmavoimat joutuneen 2020-luvulla ostamaan hävittäjäkalustoa poistuvan F-18 Hornetin tilalle. Spekulaatiot uudesta konetyypistä ovat alkaneet viritä julkisessa keskustelussa. Uusien hävittäjien kasvavat hankintakustannukset ovat herättäneet keskustelua hävittäjien Stealth- eli häiveominaisuuksien välttämättömyydestä. Vastakkainasettelussa on häivetekniikan tuottama operatiivinen suorituskyky sekä suorituskyvyn hinta.

Ilmavoimien esikunnan suunnitteluosasto on esittänyt perustutkimuksen käynnistämistä tulevaa hävittäjähankintaa varten. Tämän tutkielman tavoitteena on luoda perusta häivetekniikan kustannustehokkuuden tarkastelulle taktiikan näkökulmasta. Häivetekniikka voi mahdollistaa uudenlaisen hävittäjävoiman käyttötavan eli ilmasotataktiikan, jolla on suora vaikutus mahdollisuuksiin suorittaa hävittäjävoimalle käskettyjä tehtäviä.

### **1.1 Häivetekniikan tutkimuksen perusta**

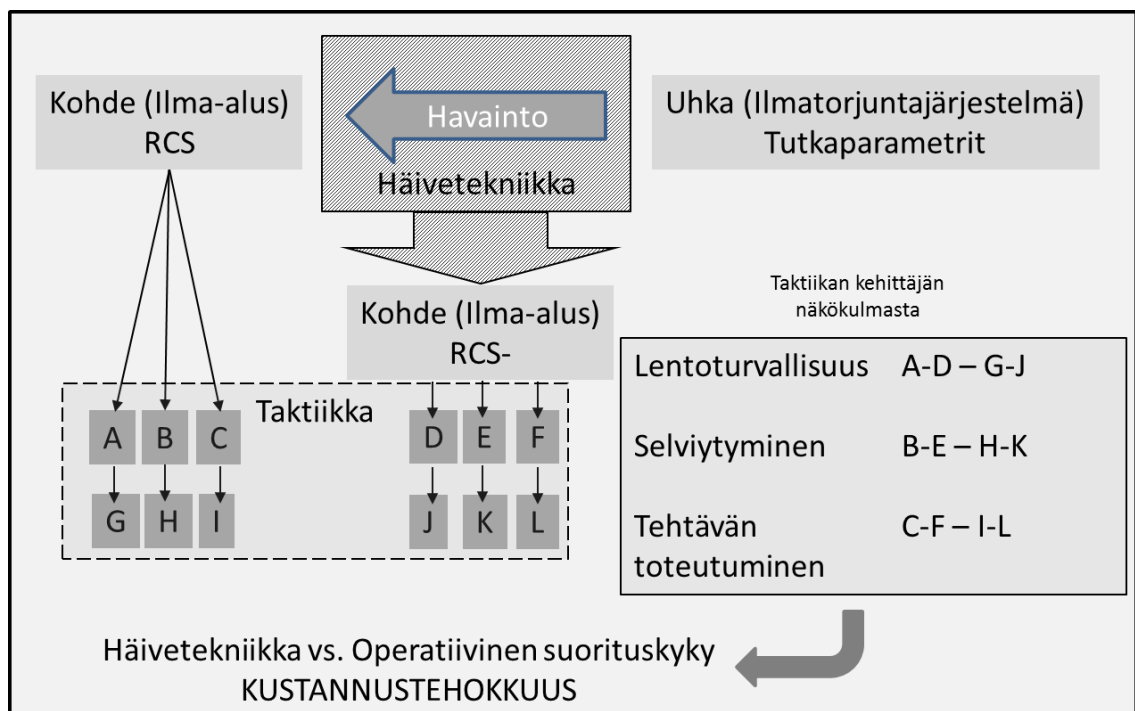
Häivetekniikan kustannusvaikutus uusiin hävittäjiin on merkittävä.<sup>1,2,3</sup> Korkeiden kustannusten johdosta on syytä tutkia häivetekniikan taktisia hyötyjä suhteessa sen hintaan. Tällä het-

---

<sup>1</sup> Zikidis, Konstantinos, Alexios Skondras, and Charisios Tokas: Low Observable Principles, Stealth Aircraft and Anti-Stealth Technologies, *Journal of Computations & Modelling 4.1*, International Scientific Press, Lontoo, UK, 2014, s. 157.

<sup>2</sup> Epps, Kenneth: *Why Joint Strike Fighter aircraft? Program costs rise and benefits carry risks*, Ploughshares Briefing 10/3, Project Ploughshares, Ontario, Kanada, 2010, s. 3.

kellä ei ole riittävän perusteltua tietoa häivetekniikan tuomista mahdollisuuksista. Tässä tutkielmassa häivetekniikkaa tarkastellaan simuloinnin avulla. Simulointiohjelmaksi valitaan BigTac-ilmataistelusimulaatio-ohjelma. BigTac on yksinkertainen, yleisesti käytössä olevissa työasemissa toimiva ohjelma, jota käytetään Suomen ilmavoimien ohjaajakoulutuksessa sekä ilmataistelun kehittämisessä. Tulevien hankintakustannusten tarkastelun perustaksi tarvitaan tietoa siitä, miten BigTac-simulointia voidaan käyttää ilmasotataktiikan tutkimisen työkaluna skenaariossa, jossa käytetään häivetekniikkaa. Tämän kysymyksen vastauksena on tarkoitus tuottaa tuleville tutkijoille ohjeistus, jonka perusteella häivetekniikan tuomia hyötyjä voidaan tutkia BigTac-simuloinnilla.



Kuva 1: Viitekehys

Tutkielmassa käsitellään kuvassa 1 esitetyjen taktiikan osa-alueiden (lentoturvallisuus, selviytyminen ja tehtävän toteutuminen) tuloksien eroavaisuuksia. Eroavaisuudet pyritään löytämään muuttamalla kohteen tutkaheijastusominaisuuksia (havainto), jolloin samalla tavalla toimivalla kohteella voi olla käytössään erilaisia toimintatapoja (taktiikka A–L). Tutkielmassa tulee näkymään taktiikan kehittäjän näkökulma, joka antaa mahdollisuuden arvioida operatiivisen suorituskyvyn kasvua suhteessa häivetekniikan hintaan. Juuri taktiikan kehittäjällä, joka

<sup>3</sup> Younossi, Obaid, Stem, David E., Lorell, Mark A., Lussieret, Frances M.: *Lessons Learned from the F/A-22 and F/A-18E/F Development Programs*, Deputy Chief of Plans and Operations (Air Force) Washington DC Directorate of Plans, Rand Corporation, Santa Monica, Yhdysvallat, 2005, s. 46.

on yleensä kokenut hävittäjälentäjä, on hyvät mahdollisuudet ottaa tämän tutkielman esittämät ohjeet käyttöön tutkiessaan häivetekniikan hyötyjä.

## 1.2 Simulointi häivetekniikan hyötyjen tarkastelussa

Tässä tutkielmassa simulointi tarkoittaa ilmataistelun simulointia, jossa sotilaalliset yksiköt asetetaan suorittamaan tehtäviä. Yksiköiden tehtävänä voi olla esimerkiksi tunkeutuminen vihollisen ilmatilaan, jossa vihollisen yksiköiden tehtävänä on esimerkiksi oman ilmatilan puolustaminen käyttäen ilmataisteluaseistusta hyökkääviä yksiköitä vastaan. Yksiköillä on käytössään erilaisia osajärjestelmiä kuten tutka, sekä aseistus esimerkiksi ilmataisteluohjukset. Osajärjestelmät mallinnetaan toimimaan mahdollisimman hyvin kuvaamaan yksikön toiminnallisuuksia tehtävän toteuttamiseksi. Tarkoituksena on saavuttaa hyvin tarkka toiminnallisuus, joka vastaa oikean yksikön toiminnallisuuksia oikeassa ilmataistelu ympäristössä.

Ilmataistelusimulaattoreita on erilaisia eri tarkoituksiin. Hävittäjäohjaajan koulutukseen käytetään yleisesti virtuaalista simulaattoria, joka vastaa toiminnallisuuksiltaan oikeata hävittäjää. Hävittäjäohjaajan koulutuksessa vihollisen simulointiin käytetään esimerkiksi BigTac-maalisimulaattoria, jossa vihollisen yksiköt simuloidaan ja yhdistetään virtuaaliseen simulaattoriin. Vihollisen yksiköiden toiminnallisuudet ovat mahdollisimman lähellä oikeiden vastustajien yksiköiden toimintojen kanssa. Koska simulaattoreiden käyttökustannukset ovat pienemmät kuin lentokoneilla tapahtuvalla ilmataistelun harjoittelulla, mikä antaa hävittäjäohjaajalle mahdollisuuden harjoitella ilmataistelulentoja turvallisessa ympäristössä kustannustehokkaasti. Tässä tutkielmassa tarkastellaan BigTac:n käytettävyyttä taktiikan tutkimuksessa.

Häivetekniikalla pyritään pienentämään kohteen havaittavuutta esimerkiksi hävittäjätutkalla. Tässä tutkielmassa häivetekniikka tarkoittaa niitä tekniikoita, millä kohteen tutkapoikkipinta-alaa pyritään pienentämään sähkömagneettisen spektrin X-alueella. Tutkielman kohde on tyyppillinen sotilasilma-alus (hävittäjä). Kohteen tutkapoikkipinta-ala on merkittävin ominaisuus, mikä vaikuttaa kohteen havaitsemiseen uhkajärjestelmän tutkalla. Tutkielmassa kohteen tutkapoikkipinta-ala asetetaan pistemäiseksi. Tämä tarkoittaa sitä, että kohteen tutkapoikkipinta-ala on saman suuruinen tarkastelukulmasta riippumatta, joten kohteesta heijastuu samansuuruinen tutkalähete riippumatta siitä, missä asennossa kohde on tai mihin suuntaan se on lentämässä. Teoreettisesti uhkajärjestelmän tutka havaitsee pistemäisen tutkapoikkipinta-alan kohteen samalta etäisyydeltä riippumatta tarkastelukulmasta. Uhkan tutkan ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi kohteen näkymiseen tutkassa. Tutkielman ulkopuolelle rajataan ilma-

kehän vaimennus, järjestelmähäviöt, aallon pituuden tai pulssin pituuden vaikutukset, anten-  
nivahvistus ja uhkan tutkan ominaisuudet. Tutkapoikkipinta-alan (Radar Cross Section –  
RCS) vaikutuksia uhkan tutkaan BigTac:ssä tarkastellaan ainoastaan etäisyyden funktiona.  
Etäisyys määritellään suoramittausetäisyydeksi kohteen sekä järjestelmän välillä.

Simulaattoreissa käytetyissä tutkamalleissa kohteen havaintoetäisyyteen vaikuttavat myös  
viiveet uhkajärjestelmän siirtyessä toimintatilasta toiseen. Tällaisia siirtymiä ovat esimerkiksi  
tutkan siirtyminen etsinnästä maalin seurantaan, tai seurannasta maalin lukitukseen ammuntaa  
varten. Tutkalle voidaan asettaa myös erilaisia rajoituksia kuten tutkan maksimietäisyys miltä  
mikään maali olisi havaittavissa. Lisäksi simulaattoriin on voitu asettaa satunnaisuuksia maa-  
lien havaintojen näkymisessä uhkajärjestelmän tutkalla. Tässä tutkielmassa tutkitaan kohteen  
tutkapoikkipinta-alan vaikutusta uhkajärjestelmien tutkien havaintoetäisyyteen sekä ammun-  
taetäisyyteen.

### 1.3 Simulaatioiden analysoiminen

Tämä tutkielma on tutkimusotteeltaan kvantitatiivinen. Tutkielmassa sovelletaan operaatiotutkimuksen osa-aluetta, simulointia. Aluksi tutkitaan BigTac:n soveltuvuutta häivetekniikan simulointityökaluksi. Tätä käsitellään tutkielman toisessa luvussa, jossa esitellään kohteen tutkapoikkipinta-alan muutoksen vaikutuksia uhkan havaintoetäisyyteen ja päätöksentekoon. Ensin selvitetään toteutuuko tutkayhtälö simulaatiossa. Seuraavaksi pitää selvittää, perustuuko uhkan päätöksenteko (uhkan aselaukaisu) vain kohteen havaintoetäisyyteen (deterministisyys). Jos kohteen tutkapoikkipinta-alan pieneneminen pienentää uhkajärjestelmän havaintoetäisyyttä ja uhkajärjestelmän päätöksentekotäisyyttä tutkayhtälön mukaisesti, voidaan todeta, että simuloinnilla voidaan tutkia häivetekniikan vaikutuksia ilmataistelussa. Tutkimushypoteeseina ovat: 1. BigTac-simulaatiossa kohteen tutkapoikkipinta-alan muutos vaikuttaa uhkajärjestelmän havaintoetäisyyteen tutkayhtälön mukaisesti, 2. BigTac-simulaatiossa kohteen tutkapoikkipinta-alan muutos vaikuttaa uhkajärjestelmän päätöksentekotäisyyteen tutkayhtälön mukaisesti.

Jos tutkimushypoteesit osoittautuvat todeksi, tutkitaan häivetekniikan vaikutuksia ilmataisteluskenaarion lopputuloksiin. Ilmataisteluskenaario esitellään kolmannessa luvussa, jossa häiveteknisiä ominaisuuksia simuloidaan muutamalla kohteiden tutkapoikkipinta-alaa. Tutkapoikkipinta-alan muutosten vaikutuksia tarkastellaan ilmataistelun tehtävärakenteen osatekijöillä. Tuloksia vertaillaan BigTac-simulointiohjeen luomiseksi, ja pyritään vastaamaan ky-

symykseen: vaikuttaako kohteen RCS:n pienentäminen lentoturvallisuuteen, kohteen selviämiseen, kohteen tehtävän toteutumiseen BigTac-ilmataisteluskenaariossa. Neljännessä luvussa esiteltävän BigTac-simulointiohjeen perusteella voidaan tarkastella uuden teknologian mahdollisuuksia uusien toimintatapojen (taktiikka) löytämiseksi. Esitellyn skenaarion tutkimustilanne on sodan aika, jossa sodan toinen osapuoli (omat joukot) suorittaa hävittäjillä ilmaoperaation sodan toisen osapuolen (vihollinen) ilmatorjuntajärjestelmällä ja hävittäjillä suojattuun ilmatilaan.

## 1.4 Simulointi sotilaallisten ongelmien ratkomisessa

Simulointia on käytetty monien sotilaallisten ongelmien tutkimisessa. Simulointia voidaan käyttää metodina esimerkiksi silloin, kun tutkitaan millaisia vaikutuksia uusilla asejärjestelmillä on olemassa olevaan taktiikkaan.<sup>4</sup> Simulointia on käytetty myös ilma-aluksen reittioptimoinnissa, jossa tarkastellaan ilma-aluksen havaittavuusominaisuuksia tutkaympäristössä.<sup>5,6</sup> Simulointi on kätevä ja halpa tapa tutkia olemassa olevia järjestelmiä uudessa ympäristössä. Simuloinnilla voidaan myös tarkastella monimutkaisia skenaarioita uusien, parempien toimintatapojen löytämiseksi.<sup>7</sup> Tässä tutkielmassa esitellään ilmataisteluskenario, jonka perusteella voitaisiin löytää uusia toimintatapoja (taktiikka). Skenaariossa simuloidaan häive-tekniikkaa (uusi järjestelmän ominaisuus) käyttäviä ilma-aluksia.

Vaikka esimerkiksi Page ja Smith kritisoiivatkin simuloinnin jaottelua virtuaaliseen simulointiin, harjoitteluun sekä konstruktiiviseen simulointiin, on jaottelu edelleen käytössä. Konstruktiivinen simulointi on pelkistettynä simulointia, jossa simuloidut ihmiset toimivat simu-

---

<sup>4</sup> Hill, Raymond R., Miller, John O., McIntyre, Gregory A.: Applications of discrete event simulation modeling to military problems, Simulation Conference, 2001. *Proceedings of the Winter Simulation Conference Vol. 1*, toimittanut B. A. Peters, J. S. Smith, D. J. Medeiros, M. W. Rohrer, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Washington DC, Yhdysvallat, 2001, s. 782.

<sup>5</sup> Norsell, Martin: *Aircraft Trajectory Optimization with Tactical Constraints*, Doctoral dissertation, Kungliga Tekniska Högskolan, Tukholma, Ruotsi, 2004, s. 23.

<sup>6</sup> Liu, Hongfu, Chen, Jing, Shen, Lincheng, Chen, Shaofei: Low observability trajectory planning for stealth aircraft to evade radars tracking, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, SAGE Publications Ltd, Lontoo, UK, 2013, s. 2.

<sup>7</sup> Feuchter, Christopher A.: *Air force analyst's handbook: On understanding the nature of analysis*, Office of Aerospace Studies, Kirtland Air Force Base, Yhdysvallat, 2000, s. 13.



loiduissa järjestelmissä (esimerkiksi ilma-alus).<sup>8</sup> Hill, Miller sekä McIntyre jatkavat, että konstruktiivinen simulointi voidaan jaotella vielä monin tavoin. Esimerkiksi deterministinen simulointi ei sisällä mitään satunnaisuuksia, kun taas stokastisessa simuloinnissa tapahtumat pohjautuvat tapahtumien sattumanvaraisuuteen.<sup>9</sup> Tässä tutkielmassa käytetty deterministinen simulointi koostuu simuloiduista hävittäjä- sekä ilmatorjuntajärjestelmistä, joiden päätöksentekoa ohjaavat simuloidut operaattorit. Deterministinen simulointi (myöhemmin simulointi) on yksinkertainen tapa tutkia yhden muuttujan (tutkapoikkipinta-ala) vaikutuksia simuloinnin lopputulokseen.

Simulointia voidaan käyttää tutkimusmetodina esimerkiksi silloin, kun tutkitaan millaisia vaikutuksia uusilla asejärjestelmillä on olemassa olevaan taktiikkaan.<sup>10</sup> Simulointia on käytetty myös ilma-aluksen reittioptimoinnissa, jossa tarkastellaan ilma-aluksen havaittavuusominaisuuksia tutkauhka-ympäristössä. Norsell väittää, että tällaisessa tutkimuksessa ilma-aluksen tutkapoikkipinta-alaa on tarkasteltava jatkuvasti muuttuvana.<sup>11</sup> Norsellin ehdottama lähestymistapa vaatii kuitenkin merkittäviä määriä aikaa ja rahaa selvitetessä ilma-aluksen tarkkoja ominaisuuksia.

## 1.5 Taktiikan analysointi osatekijöiden tuloksilla

Schulte kirjoittaa taistelulentäjien hyötyvän merkittävästi taistelulentojen osatekijöiden automaatiosta. Jotta lentokoneen järjestelmien automatisointi on mahdollista rakentaa, on taistelulentäjien tehtävärakenne pilkottava ensin osatekijöihin. Schulten tavoite-tehtävämallissa osatekijät ovat: lentoturvallisuus, selviytyminen sekä tehtävän toteutuminen. Malli osatekijöineen on mielekäs tapa toteuttaa lentäjän tehtävärakenne automaatiojärjestelmässä.<sup>12</sup> Tyypillinen taistelulento koostuu useasta osatekijästä. Osatekijöitä ovat esimerkiksi lentoonlähtö, siirty-

---

<sup>8</sup> Page, Ernest H., Smith, Roger: Introduction to military training simulation: a guide for discrete event simulationists, *Winter Simulation Conference Proceedings*, toimittanut D. J. Medeiros, Edward F. Watson, John S. Carson, Mani S. Manivannan, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Washington DC, Yhdysvallat, 1998, ss. 53–60.

<sup>9</sup> Hill (ja muut 2001), s. 780.

<sup>10</sup> Sama, s. 782.

<sup>11</sup> Norsell (2004), s. 23.

<sup>12</sup> Schulte, Axel: Mission Management and Crew Assistance for Military Aircraft – Cognitive Concepts and Prototype Evaluation, luentosarja LS 227, *Tactical Decision Aids and Situational Awareness*, The Research and Technology Organisation (RTO) of NATO, Hull, Kanada, 2001, ss. 4-1 – 4-19.

minen taistelualueelle, itse taistelu, paluulento sekä lasku. Ilmataistelu on sekin pilkottavissa osatekijöihin, ja ne taas uudelleen osatekijöihin. Taktiikan voidaan ajatella olevan lentäjän valitsemaa peräkkäisiä osatekijöitä, mikä toivottavasti johtaa tehtävän onnistuneeseen toteutumiseen turvallisesti ja ilman tappioita (omia hävittäjiä ei ammuta uhkien toimesta). Vaikka Schulten mallia ei ole käytetty taktiikan vaikutusten analyysiin, voidaan sitä käyttää taktiikan hyvyden arviointiin mallin osatekijöiden toteutumisella.

Sormunen ja Eskelinen kirjoittivat Bézier:n pintojen muodon tunnistusmenetelmästä maavoimien yksiköiden taktisessa analyysissä. He arvioivat yksiköiden taistelua CMEP-matriisin (johtaminen, liike, vaikutus ja ylläpito) taktiikan osatekijöistä. Sormunen ja Eskelinen kuitenkin jatkavat, että taktisten periaatteiden muuttaminen mitattaviksi arvoiksi on erittäin työlästä.<sup>13</sup> Vaikka heidän esittämänsä menetelmä taktiikan analyysiksi on erittäin käyttökelpoinen, ilmataistelutaktiikan muuttaminen mitattaviksi arvoiksi on erittäin haastavaa. Tässä tutkielmassa käytetään Schulten tavoite-tehtävämallin osatekijöitä hävittäjien käyttöperiaatteiden vaikutusten mittarina.

Simuloitaessa ilmataistelua voidaan tarkastella millaisia vaikutuksia hävittäjäohjaajan päätöksenteoilla on esimerkiksi selviytymiseen ilmataistelussa.<sup>14</sup> Kun simuloinnin hävittäjään lisätään häiveominaisuuksia, voidaan tarkastella millaisia taktisia vaihtoehtoja häivetekniikka mahdollistaa. Kun simulointia käytetään taktiikan arviointiin ja kehittämiseen, voidaan saada aikaan merkittäviä säästöjä<sup>15</sup>. Esimerkiksi lentotoiminnan kustannuksia ei synny, koska simulointiin ei liity lentämistä oikeilla ilma-aluksilla.

## 1.6 Häivetekniikka simulaatiossa

Tutka on edelleen merkittävin väline, jolla lentäviä kohteita kyetään havaitsemaan. Tutkan havaitseminen perustuu tutkan sähkömagneettisen säteilyn heijastumiseen takaisin ilma-aluksesta tutkan vastaanottimelle. Kohteena olevan ilma-aluksen tutkapoikkipinta-ala (Radar

---

<sup>13</sup> Sormunen, Jari, Eskelinen, Harri: Utilizing Bézier surface pattern recognition for analyzing military tactics, *Proceedings of the Finnish Operations Research Society 40th Anniversary Workshop – FORS40*, toimittanut Collan, Mikael, Hämäläinen, Jari, Luukka, Pasi, elektroninen julkaisu, Lappeenranta, Suomi, 2013, s. 25.

<sup>14</sup> Feuchter (2000), s. 11.

<sup>15</sup> Heinze, Clinton, Goss, Simon, Josefsson, Torgny, Bennett, Kerry, Waugh, Sam, Lloyd, Ian, Murray, Graeme, Oldfield, John, Interchanging agents and humans in military simulation. *AI Magazine* 23(2), toimittanut Steve Chien, Haym Hirsh, American Association for Artificial Intelligence, Palo Alto, Yhdysvallat, 2002, s. 46.

Cross Section – RCS) määrittää heijastuvan sähkömagneettisen säteilyn määrän. RCS koostuu useasta tekijästä, kuten kohteen koosta, muodosta, materiaaleista (etenkin pintamateriaaleista), tutka-antennin sijainnista suhteessa kohteeseen, kohteen asennosta suhteessa tutkaan, tutkasäteilyn taajuudesta ja tutka-antennin polarisaatiosta. Grant jatkaa, että lentokoneiden aerodynaamisia ominaisuuksia parantavat osat parantavat myös tutkan mahdollisuuksia havaita sähkömagneettisen säteilyn heijastuminen pitkien etäisyyksien päästä. Kun uhkajärjestelmän tutkan lähetysteho  $P_T$  kerrotaan antennin vahvistuksen  $G$  neliöllä, saadaan tutkakeilan kohteeseen suunnattu teho. Tämän lisäksi huomioidaan vastaanottimen antennin kaistanleveys käyttämällä tutkapulssin pituutta  $\tau$  ja käytettävää aallonpituutta  $\lambda$ . Edellisistä vähennetään järjestelmähäviöt  $L_{sys}$  sekä ilmakehän aiheuttamat vaimennukset  $L_{atm}$ , ja huomioidaan tutka-poikkipinta-alan  $\sigma$  ja kaksinkertaisen säteilyn etenemisen vaikutus vastaanotettuun tutkasäteilyyn. Kun edellisiin otetaan huomioon pienin sallittu signaali-kohinasuhde  $SNR_{min}$  ja vähennetään Boltzmannin vakion  $k$  sekä järjestelmän kohinalämpötilan  $T_{sys}$  vaikutus vastaanottimella, tutkan havaintoetäisyydeksi  $R$  saadaan tutkayhtälö:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_T \times G^2 \times \lambda^2 \times \tau \times \sigma \times L_{sys} \times L_{atm}}{(4\pi)^3 \times k \times T_{sys} \times SNR_{min}}} \quad (1)$$

Tutkayhtälön mukaisesti mitä suurempi osa tutkasäteilystä heijastuu lentokoneesta kohti tutkan vastaanotinta, sitä kauempaa lentokone on havaittavissa.<sup>16,17</sup> Häivetekniikka pyrkii eri menetelmillä pienentämään kohteen havaittavuutta. Tutkan käyttämällä sähkömagneettisen spektrin alueella pyritään pienentämään kohteen RCS:ää kuitenkin siten, että kohde kykenee lentämään sen tehtävän vaatimalla tavalla. Koska RCS on näin merkittävässä roolissa tutkan toiminnassa osana ilmasotaa, tässä tutkielmassa tutkitaan juuri RCS:n vaikutusta vaihtoehtoihin toimintatapoihin ja mahdollisuuksiin tutkia uusia toimintatapoja (taktiikkaa).

RCS:n käyttäminen simulaatiossa voi johtaa myös harhaan. Koska RCS:n pienentäminen on toteutettu olemassa olevissa häiveteknologiassa käyttävissä ilma-aluksissa pääasiallisesti muotoilun keinoin, kohteella on edelleen merkittäviä RCS-piikkejä. Nämä RCS-piikit ovat havaittavissa uhkien tutkilla. Kohdetta tarkasteltaessa eri kulmista, kohteen näkökulmasta hyvien ja huonojen kulmien erot ovat merkittäviä. Tämän vuoksi muun muassa Norsell ehdottaa, että

<sup>16</sup> Toomay, John, Hannen, Paul J.: *Radar Principles for the Non-Specialist*, SciTech Publishing, Herndon, USA, 2004, s. 79.

<sup>17</sup> Grant, Rebecca: *The Radar Game*, Mitchell Institute Press, Washington D.C., USA, 2010, s. 16.

tutkimusskenaarioissa olisi syytä käyttää optimoituja reittejä, jotta kaikista niistä RCS:n pienentämisen keinoista saataisiin irti maksimaalinen hyöty.<sup>18,19</sup> RCS-piikkien tutkiminen vaatii kuitenkin huomattavan määrän aikaa ja rahaa. Tämä vaatisi esimerkiksi häiveteknologialla varustetun hävittäjän RCS-mittauksia, tai tarkkoja laskennallisia arvioita RCS-arvoista eri kulmilla. Kun uuden hävittäjän hankintaa ollaan vasta aloittamassa, tähän ei tulla kuitenkaan pääsemään, koska hävittäjäkandidaattien valmistajat eivät todennäköisesti halua paljastaa hävittäjän tarkkoja ominaisuuksia. Toisaalta RCS-arvot voitaisiin arvioida laskennallisiin malleihin perustuen. Kuitenkaan tätä lähestymistapaa ei ole mielekästä valita, koska malleilla ei kuitenkaan päästä tarvittaviin tarkkuuksiin eri kulmien RCS-piikkien osalta.

Tutkalähetteen heijastuminen kohteesta on osa kokonaisenergiämäärää mitä tutkan vastaanotin voi mahdollisesti ottaa vastaan. Pienimmätkin muutokset kohteen asennossa suhteessa tutkan läheteeseen sekä vastaanottimeen voivat muuttaa kohteessa esiintyvien heijastusten laatua ja tätä kautta tutkan vastaanotinta kohti heijastuvaa kokonaisenergiämäärää. Asennon hallinta kolmiulotteisessa ympäristössä on todella haastavaa, eikä käytössä olevilla simulointityökaluilla ole edes mahdollisuutta käyttää tarvittavan tarkkaa tutkapoikkipinta-alamallinnusta.

Vaihtoehtona on käyttää yksinkertaistettua tutkapoikkipinta-alamallia, kuten Fuzzball. Tämän mallin tutkapoikkipinta-ala on samansuuruinen tarkastelukulmasta riipumatta.<sup>20</sup> Heijastusten lisäksi niin sironta kuin kohteen pintamateriaali vaikuttavat kohteesta tutkan vastaanottimelle palaavaan kokonaisenergiämäärään. Simulointityökalujen suorituskky ei mahdollista myöskään näiden ominaisuuksien tarkastelua kolmiulotteisessa ympäristössä. Täten tässä tilanteessa on valittava rohkeampi lähestymistapa ja tutkittava ainoastaan yksinkertaisen RCS:n pienentämisen vaikutuksia yleisesti. Tämä antaa tutkijalle mahdollisuuden tarkastella juuri häiveteknologian kustannuksia suhteessa arvioituun taktiseen hyötyyn. Tämä kustannustehokkuuden näkökulma pakottaa tutkijan käyttämään häiveteknologian yksinkertaistettua mallia eli Fuzzballia (pistemäinen RCS).

Tämän päivän käytettävissä oleva häiveteknologia mahdollistaa olemassa olevien taktiikoiden tehokkaamman käytön. Norsell kuitenkin arvioi, että uusia parempia tuloksia voidaan saada

---

<sup>18</sup> Norsell (2004), s. 14.

<sup>19</sup> Liu (ja muut 2013), s. 1.

<sup>20</sup> Grant (2010), s. 37.

aikaan tutkimalla samanaikaisesti häiveteknologiaa ja taktiikkaa.<sup>21</sup> Vaihtoehtoisesti tällaista tutkimusta voitaisiin tehdä siten, että operaattori otetaan mukaan simulaatioon. Tällöin operaattori voi simuloinnin aikana antaa palautetta käytetyistä menetelmistä ja luoda uusia käyttöperiaatteita uudessa toimintaympäristössä. Tämän jälkeen simulointiympäristö muokataan vastaamaan operaattorin antamaa palautetta. Koska operaattori on simulaatiossa läsnä, häneltä saadaan nopea palaute käytettävästä taktiikasta. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin simulaatioiden toistettavuus, jotta tilastollisesti merkittäviä tuloksia voitaisiin käyttää johtopäätösten tekemiseksi.<sup>22</sup> Toistettavuuden vuoksi, tässä tutkielmassa tutkitaan häiveteknologian vaikutuksista taktiikkaan juuri konstruktivisessa simulaatiossa eikä oteta operaattoria muokkamaan käytettävää taktiikkaa.

Häivetekniikkaa on tutkittu pääsääntöisesti matemaattisesti sekä mittaamalla. Häivetekniikan mahdollistamia taktiikoita on todennäköisesti kehitetty operatiivisessa koelentotoiminnassa, mutta näitä tutkimuksia ei ole julkaistu. Tästä lähtökohdasta tämä tutkimus voi antaa täysin uuden lähestymistavan tarkastella häivetekniikan mahdollisuuksia taktiikassa. Tämä tutkimus voi myös antaa mahdollisuuden vastata tutkimuksen tavoitteeseen tarkastella häivetekniikan kustannustehokkuutta taktiikassa. Aluksi on kuitenkin tarkasteltava BigTacin soveltuvuutta häivetekniikan tutkimuksessa.

---

<sup>21</sup> Norsell (2004), s. 11.

<sup>22</sup> Thomas, Stephen E., and Martin, Cindy, Using virtual simulation for tactics development for constructive simulation, *American Institute of Aeronautics & Astronautics Meeting Papers*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Yhdysvallat, 2000, s. 1.

## 2 PISTEMÄISEN TUTKAPOIKKIPINTA-ALAN KOHTEEN HÄIVETEKINEN TARKASTELU BIGTAC-ILMATAISTELUSIMULAATIOSSA

### 2.1 Havaintoetäisyys

Luvussa 1.3 esitettyä ensimmäistä hypoteesia tutkittaessa suoritetaan koe, jossa simulaatiossa tarkastellaan uhkajärjestelmän havaintoetäisyyttä kohteesta. Ensimmäinen hypoteesi on: simulaatiossa kohteen RCS:n vaikutus uhkajärjestelmän havaintoetäisyyteen on suoraan verrannollinen tutkayhtälöön. Kohteelle annetaan pistemäinen tutkapoikkipinta-ala (RCS1). Uhkajärjestelmäksi asetetaan hävittäjä. Uhkajärjestelmä ei ole toteutettu oikeisiin järjestelmätietoihin perustuen, vaan ne ovat simulaation perusasetuksia tyypilliselle uhkajärjestelmälle. Uhkajärjestelmän järjestelmätiedoilla ei ole merkitystä tämän tutkielman lopputuloksen kannalta, koska tarkoituksena on tarkastella simulaation ominaisuuksia eikä pureutua tietyn uhkajärjestelmän toiminnallisuuksiin.

Kokeessa havainnoidaan uhkan havaintoetäisyydet kohteesta RCS1:llä. Tämän jälkeen kohteen RCS muutetaan pienemmäksi (RCS2). Muutoksen tarkoituksena on luoda kohteelle häiveteknisiä ominaisuuksia. Mitataan uhkan havaintoetäisyydet kohteesta RCS2:lla.

Tutkimushypoteesin toteutumista tarkastellaan uhkajärjestelmän havaintoetäisyyden muutoksena eri RCS:llä. Eli kohteen RCS:n pienentyessä uhkajärjestelmien havaintoetäisyydet pienenevät tutkayhtälön mukaisesti.

Täten RCS1:llä ( $\sigma_1$ ) saatu havaintoetäisyys (R1) tulisi tutkayhtälön mukaan olla:

$$R1 = \sqrt[4]{\frac{P_T \times G^2 \times \lambda^2 \times T \times \sigma_1 \times L_{atm} \times L_{atm}}{(4\pi)^3 \times k \times T_{sys} \times SNR_{min}}} \quad (2)$$

RCS2:lla saatu havaintoetäisyys (R2) tulisi tutkayhtälön mukaan olla:

$$R2 = \sqrt[4]{\frac{P_T \times G^2 \times \lambda^2 \times T \times \sigma_2 \times L_{atm} \times L_{atm}}{(4\pi)^3 \times k \times T_{sys} \times SNR_{min}}} \quad (3)$$

Kun uhkan tutkan lähetysteho  $P_T$ , antennivahvistus  $G$ , aallon pituus  $\lambda$ , pulssin pituus  $\tau$ , tutka-järjestelmän häviöt  $L_{sys}$ , ilmakehän vaimennus  $L_{atm}$ , järjestelmän kohinalämpötila  $T_{sys}$  sekä pienin sallittu signaalikohinasuhde  $SNR_{min}$  ovat vakioita (Bolzmannin vakion  $k$  lisäksi), tulee  $R2:n$  olla:

$$R2 = R1 \times \sqrt[4]{\frac{\sigma_2}{\sigma_1}} \quad (4)$$

Hypoteesia testataan kahdella RCS:llä. RCS1:n arvo on  $3 \text{ m}^2$  ja RCS2:n arvo on  $0,003 \text{ m}^2$ . Kaavan 4 perusteella etäisyyksien  $R2$  ja  $R1$  suhdeluvun tulee olla 0,178.

$$\frac{R2}{R1} = \sqrt[4]{\frac{\sigma_2}{\sigma_1}} = 0,178 \quad (5)$$

Tutkija kykenee BigTac:llä mittaamaan uhkan ja kohteen välisen etäisyyden sekunnin tarkkuudella. Yhden sekunnin aikana uhkan ja kohteen välinen etäisyys muuttuu uhkan sekä kohteen kohtaavan nopeuden perusteella. Lasketaan maksimimittausvirhe yhden sekunnin aikana. Jos etäisyys on mitattu liian aikaisin, niin etäisyyteen  $R1$  lisätään sekunnin aikana kasvanut etäisyys. Jos etäisyys on mitattu liian myöhään, niin etäisyydestä  $R2$  vähennetään sekunnin aikana pienentynyt etäisyys. Näistä saadaan etäisyyden  $R$  minimi sekä maksimi. Kun etäisyyksien suhdelukujen minimiä ja maksimia vertaillaan, saadaan suurin mahdollinen etäisyyksien mittausvirhe. Mitattujen etäisyyksien suhdeluvun suurin hyväksytty ero on 0,008, joten etäisyyksien  $R2$  ja  $R1$  suhdeluvun tulee olla 0,170–0,186. Jos mitattu suhdeluku on tällä välillä, voidaan hypoteesi todeta oikeaksi.

## 2.2 Ammuntaetäisyys

Toista hypoteesia tutkittaessa edellä mainittu koe suoritetaan uudelleen siten, että simulaatiota jatketaan uhkan aseiden laukaisutilanteeseen. Toinen hypoteesi on: simulaatiossa kohteen RCS:n vaikutus uhkajärjestelmän päätöksentekotäisyyteen on suoraan verrannollinen tutkayhtälöön. Jos laukaisuhetki on tutkayhtälön mukaisesti suoraan verrannollinen kohteen RCS:n muutokseen, voidaan todeta, että myös uhkan päätöksenteon muutos perustuu vain kohteen RCS:n muutokseen.

Jos toinen hypoteesi osoittautuu vääräksi, on selvittettävä miten uhkajärjestelmän ammuntalogiikka on rakennettu. Ammuntalogiikkaan voidaan asettaa joitain rajoituksia tai viiveitä, jotka voivat esittää uhkajärjestelmän ohjaajan tai järjestelmän suorituskykyviiveitä. Jos edeltävällä tarkastelu ei vahvista hypoteesia todetaan, että BigTac:ssä ammuntalogiikka on dynaaminen kuvaten ilmataistelutilannetta jossa on useita muuttujia. Kun BigTaciä on tarkasteltu ensin uhkan havaintoetäisyyden perusteella ja todettu BigTac soveltuvaksi todetaan, että myös BigTacin ammuntalogiikka soveltuu häivetekniikan tarkasteluun ilmataisteluskenaariossa, vaikka ammuntaetäisyyden muutos ei ole suoraan verrannollinen RCS:n muutokseen.

### 2.3 Tulokset

Ensimmäisen kokeen tuloksena R1:n ja R2:n suhdeluku oli 0,216. Koe toistettiin ja lisäksi käytettiin useampaa tutkapoikkipinta-alaa. Kaavan 4 perusteella suhdeluvun olisi tullut olla 0,170–0,186, mutta kokeilla ei päästy vaadittuun suhdelukuun, joten ensimmäinen hypoteesi todettiin vääräksi.

Uhkan tutkan järjestelmäasetuksista ei löytynyt mitään sellaista, joka olisi voinut selittää kokeen tulosta. Koejärjestelyitä varten hypoteesissa tutkayhtälön ilmakehän vaimennus määritettiin läpäisykerroinvakioksi  $L_{\text{atm}}$ . Kokeen jälkeen ilmakehän vaimennusta tarkasteltiin siten, että ilmakehän vaimennus  $L_{\text{atm}}$  muutettiin eksponentiaalisesti muuttuvaksi vaimenemiseksi  $\exp(-2\alpha R)$ , jossa  $\alpha$  oli yhdensuuntaisen etenemisen vaimennus desibeleinä kilometriä kohden. Kun  $\alpha$  määritettiin tyypilliseksi X-alueen arvoksi 0,002 dB/km<sup>23</sup>, R1:n ja R2:n suhdeluvun oli oltava 0,212–0,228. Lisätesteissä kokeiltiin useampaa RCS-arvoa 6 dekadin alueelta. Testien perusteella uhkan havaintoetäisyyksien suhdeluvut vastasivat RCS-arvojen suhdelukuja. Kun R1:n ja R2:n suhdeluku oli 0,216 voitiin todeta, että BigTac:ssä käytetään X-alueelle tyypillistä ilmakehävaimennuskerrointa. Kokeen tulosten perusteella todettiin, että tutkayhtälö toteutuu BigTac-simulaatiossa. Vaikka ensimmäinen hypoteesi osoitettiin vääräksi, BigTac soveltui häivetekniikan vaikutusten tutkimiseen uhkan tutkan havaintoetäisyyden perusteella.

Toisen kokeen tuloksena uhkan ammuntaetäisyyden muutos oli aina vakio. Tämä tarkoittaa sitä, että riippumatta siitä miltä etäisyydeltä uhkan tutka havaitsi kohteen, uhka ampui aina vakioviiveellä havaintoetäisyyden jälkeen. Kokeen tulosten perusteella uhkan päätöksenteko

---

<sup>23</sup> Skolnik, Merrill I.: *Introduction to radar*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, USA, 1962, s. 516.



(uhkan aselaukaisu) perustui vain kohteen havaintoetäisyyteen, joten toinen hypoteesi todettiin oikeaksi

Kahden kokeen perusteella todettiin, että kohteen tutkapoikkipinta-alalla oli tutkayhtälön mukainen vaikutus uhkajärjestelmän tutkan havaintoetäisyyteen ja ammuntaetäisyyteen. BigTac-simulointia voidaan käyttää tutkimusvälineenä tutkapoikkipinta-alan muutosten vaikutuksien tarkasteluun ilmataistelun tehtävärakenteen osatekijöiden avulla.

### 3 HÄIVETEKININ SKENAARIOTARKASTELU BIGTAC:SSÄ

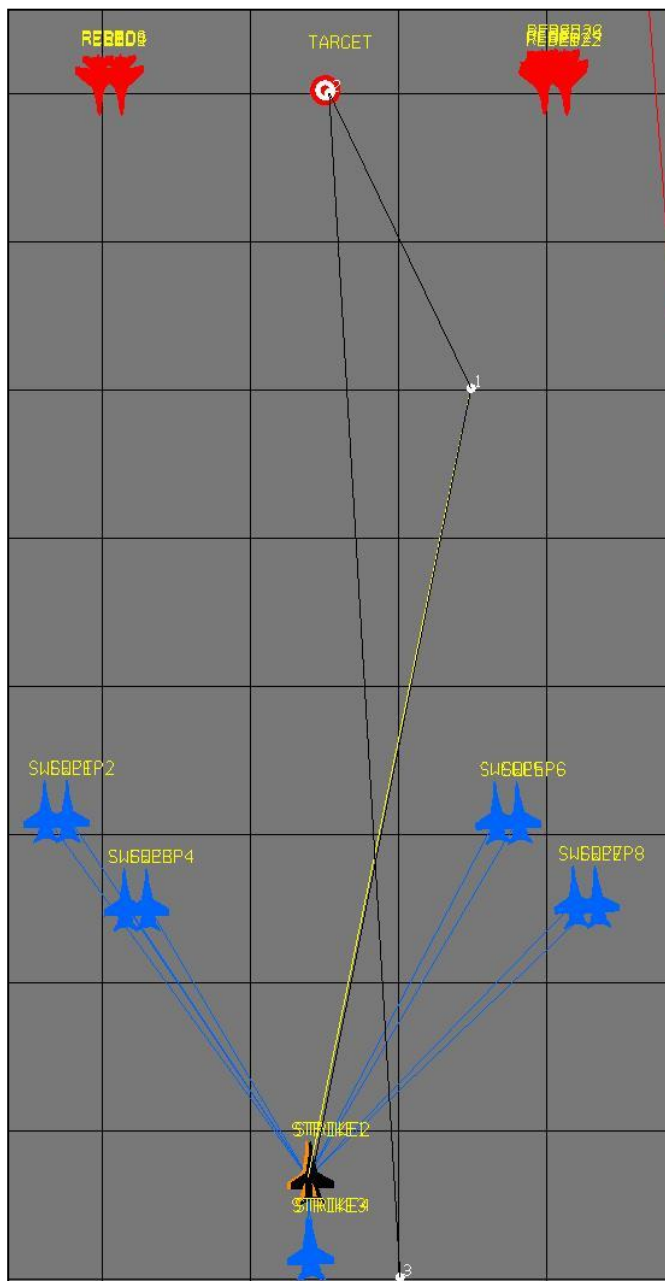
Hypoteesien osoittautuessa todeksi, tutkitaan esiteltävässä skenaariossa häivetekniikan vaikutuksia lentoturvallisuuteen, kohteen selviämiseen ja kohteen tehtävän toteutumiseen.

#### 3.1 Ilmataisteluskenario

Luodaan skenario, joka kuvaa perinteistä hyökkäävää ilmaoperaatiota. Simulaation järjestelmät ovat samoja, joita käytettiin edellisissä kokeissa. Skenaariossa kohteet (sininen) tunkeutuu uhkan (punainen) alueelle maalin tuhoamiseksi. Sinisellä osapuolella on hyökkäävä osa sekä suojaavat osat ja punaisella puolella on hävittäjiä. Punaisten tehtävänä on suojata maalia tuhoamalla sininen osapuoli. Molemmille osapuolille, siniselle ja punaiselle, luodaan lähtöasetelma ja annetaan tehtävä.

Sinisiä on kahta erilaista tyyppiä. Sinisten hyökkäävien hävittäjien, nimiltään Strike 1–4, tehtävänä on lentää määriteltyä reittiä kohteelle (Target). Sinisten suojien, nimiltään Sweep 1–8, tehtävänä on suojata hyökkääviä hävittäjiä vihollishävittäjiltä. Punaisten hävittäjät ovat nimeltään Red 1–6 ja Red 21–26.

Skenaarion parametreja (esimerkiksi etäisyyksiä, nopeuksia, korkeuksia, ammuntaetäisyyksiä) ei esitellä tässä tutkielmassa vaan ne ovat tutkijan hallussa.



Kuva 2: Skenaarion lähtöasetelma

Kuvassa 2 on esitetty skenaarion lähtöasetelma. Sinisten suojien (Sweep) sekä punaisten hävittäjien (Red) välinen etäisyys on suurempi kuin mikä on punaisten hävittäjien tutkien maksimihavaintoetäisyys. Sweepien tehtävänä on suojata Striket muodostamalla partiointialue Targetin lähistölle. Tällä pyritään luomaan Strikeille mahdollisuus suorittaa tehtävä lentämällä Targetille pisteen 1 kautta. Targetin jälkeen Sweepit suojaavat Strike-osastoa niiden reitillä pisteelle 3 asti. Red-osasto toimii siten, että Red-pari aktivoituu minuutin välein Targetin molemmilla puolilla. Aktivoitumisella kuvataan punaisen hävittäjäosastojen lentoonlähtöviiveitä tyypillisestä lentotukikohdasta. Tällöin kaikki punaiset eivät ole valmiiksi ilmassa, vaan ne suorittavat lentoonlähdöt pareittain kahdesta eri tukikohdasta. Tukikohtia ei ole kuvattu, vaan

valitulla aktivoitumisviiveellä hallitaan skenaarion käynnistymistä BigTac:ssä. Punaisten tehtävänä on torjua sinisen lentokoneet, jotta Strike-osasto ei pääse kohteelleen Targetille.

Skenaarioista havainnoidaan seuraavia arvoja:

- Lentoturvallisuus
  - lentoarvorajoitusten rikkomisten lukumäärä
  - maahan törmäämisten lukumäärä
- Selviytyminen
  - alas ammuttujen sinisten hävittäjien lukumäärä
- Tehtävän toteutuminen
  - alas ammuttujen vihollishävittäjien lukumäärä
  - Strike 1–4:n Targetille pääseminen

Lentoturvallisuuden tekijöitä on hankala arvioida. Kuitenkin tämä on mahdollista ja taktiikan toimivuuden näkökulmasta myös välttämätöntä – voihan olla, että uusi taktiikka voi olla vaikeata toteuttaa. Skenaariosta mitataan lentoarvorajoitusten lukumäärää, jonka arvo voi olla 0– $\infty$ . Lentoarvorajoitukset ovat BigTacin oletusarvoja, joita ovat esimerkiksi: konetyypin maksimi nopeus, maksimi korkeus, maksimi kuormitusarvokerroin. Sinisten maahan törmäämisen arvo voi olla 0–12. Alas ammuttujen sinisten lukumäärä voi olla 0–12. Alas ammuttujen vihollishävittäjien lukumäärä voi olla 0–12. Strike 1–4 Targetille pääsemisen lukumäärä voi olla 0–4.

Skenaario toistetaan siten, että sinisen kohteiden RCS:ää muutetaan pienemmäksi (RCS2). Muutoksen tarkoituksena on luoda kohteelle häiveteknisiä ominaisuuksia. Aikaisempien kohteiden perusteella, uhkien havaintoetäisyydet ja päätöksentekoetäisyydet muuttuvat vain kohteen havaintoetäisyyden muutoksen perusteella. Toisesta skenaariosta havainnoidaan samat osatekijät kuin edellisestä skenaariosta.

## 3.2 Tulokset

Taulukossa 1 on esitetty skenaarioiden tulokset. Skenaariossa RCS:n pienentäminen vaikutti selviytymisen osatekijään, mutta se ei vaikuttanut lentoturvallisuuteen tai tehtävän toteutumiseen.

		RCS1	RCS2
<b>Lentoturvallisuus</b>			
lentoarvorajoitusten rikkomisten lukumäärä	0–∞	0	0
maahan törmäämisten lukumäärä	0–12	0	0
<b>Selviytyminen</b>			
alas ammuttujen sinisten hävittäjien lukumäärä	0–12	3	2
<b>Tehtävän toteutuminen</b>			
alas ammuttujen vihollishävittäjien lukumäärä	0–12	12	12
Strike 1–4:n Targetille pääseminen	0–4	4	4

Taulukko 1: Skenaarioiden tulokset

Pienentyneen RCS:n oletettiin varsinkin selviytymisen osalta vaikuttavan merkittävämmiin ilmataistelun tehtävärakenteen osatekijöihin. Kun skenaarioita tarkastellaan simulaation ollessa käynnissä, on selkeästi havaittavissa punaisten heikentynyt kyky käyttää tutkaa aseiden käyttämiseksi sinisiä vastaan. Punaisilla on kyky käyttää aseistustaan myös ilman tutkan apua. Sinisten käyttämä taktiikka ei ollut yhtä tehokas kuin mitä se on ollut aikaisempien simulointien perusteella. Tämä näkyi muun muassa siinä, että siniset eivät kenneet käyttämään aseistustaan punaisen parin molempiin hävittäjiin, mikä aikaisempien simulointien perusteella on ollut normaali toimintatapa.

Koska tulokset eivät olleet merkittävän erilaisia, ja koska varsinkin sinisen hävittäjät toimivat tehottomasti voidaan sanoa, että BigTac-simulointia ei voida käyttää sellaisenaan häivetekniikan vaikutuksien arvioimiseen. BigTaciä voidaan käyttää vaikutuksien arvioimiseen, kun tutkimukseen asetetaan reunaehdot, joilla tutkimuksen tulokset ovat vertailukelpoisia. Sinisten hävittäjien asetukset pitää varmistaa jokaisen koneen osalta. Selviytymisen osatekijän tarkastelu on suoritettava vain punaisten hävittäjien tutkien avulla suoritettavien torjuntajoukkojen osalta. Punaisten torjunnat muilla menetelmillä pitää rajata tarkastelun ulkopuolelle, mikä on mahdollista BigTacin tapahtumalokin avulla. Edellä kuvattujen tulosten perusteella voidaan esittää ohjeistus BigTac:n käyttöohjeeksi häivetekniikan tutkimukselle, mutta se ei sellaisenaan ole riittävä vertailtavissa olevien tulosten saamiseksi.

Ainoastaan yhden skenaarion perusteella ei voida sanoa, että BigTac on yksiselitteisesti käytettävissä häivetekniikan vaikutuksien tutkimiseen. Kuitenkin BigTacin deterministisyys mahdollistaa vertailukelpoisten ja toistettavien tulosten saamisen myös pienellä simulointimäärällä. Tämä kuitenkin edellyttää, että simulaation rakentamisessa käytetään hyväksi asiantuntijaa.

## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kahden kokeen perusteella todettiin, että kohteen tutkapoikkipinta-alalla oli tutkayhtälön mukainen vaikutus uhkajärjestelmän tutkan havaintoetäisyyteen ja ammuntaetäisyyteen. Osatekijöitä tutkittiin esitellyssä skenaariossa, jossa RCS:n pienentäminen vaikutti selviytymisen osatekijään. Skenaariossa sinisen osapuolen hyökkäyksellinen ilmaoperaatio kyettiin suorittamaan pienemmillä tappioilla. Jotta BigTaciä voitaisiin käyttää häivetekniikan tutkimiseen, on sinisten toimintatapoja kehitettävä simuloinnin aikana. Tähän tulee käyttää asiantuntijoita, eli operaattoreita. Tämä on todennäköisesti pitkä prosessi, koska palaute saadaan vasta yhden simuloinnin jälkeen. Operaattorilta saatu palaute johtaa simuloinnin muokkaamiseen, mikä sekin vaatii useampia kokeiluja. Tällaisia toistuvaa kehittämistä jatketaan, kunnes sinisten toimintatavat ovat asiantuntijan arvion mukaan hyväksyttäviä. Tulosten perusteella voitiin todeta, että ilmataistelun tehtävärakenteen osatekijöiden avulla BigTac:ä voidaan käyttää ilmasotataktiikan tutkimisen työkaluna käytettäessä häivetekniikkaa. Tämä vaatii kuitenkin tutkimuksen rajaamista edellä mainituilla tavoilla.

### 4.1 BigTac-skenaarioasetukset häivetekniikan hyötyjen tutkimisessa

Kun tutkitaan häiveteknisiä ominaisuuksia taktiikan näkökulmasta BigTac:llä, on tämän tutkielman tulosten perusteella suositeltava käytettävän jäljessä esitettyjä BigTac:n asetuksia ja tehtävärakenteen osatekijöitä. BigTacin asetuksia määritettäessä sinisten hävittäjien asetukset pitää varmistaa jokaisen koneen osalta. Kohteiden RCS-arvoina käytetään pistemäistä RCS-maalialia. Ilmataisteluaseiden RCS-arvot asetetaan nolaksi. Tämä suoritetaan siksi, että ei voida sanoa varmasti miten ilmataisteluaseiden RCS esiintyy eri kohteissa. Kun tarkastellaan ainoastaan häivetekniikan vaikutuksia hävittäjässä, ilmataisteluaseiden RCS:llä ei ole merkitystä. RCS-arvoksi kannattaa valita sellainen arvo, mikä kohteella olisi parhaimmalta kulmalta uhkaan nähden. Tämä johtuu siitä, että ohjaajalla olisi skenaariossa käytössään tieto siitä, millä kulmalla uhkaa kannattaa lähestyä uhkan tutkan havainnoinnin näkökulmasta.

Aloitustilanne määritetään sellaiseksi, että uhkalla ei ole mahdollisuutta havaita kohdetta välittömästi. Jos näin ei toimittaisi, häivetekniikan hyötyjä ei voitaisi tutkia. Kaikkien hävittäjien asetuksista pitää valita sekä Randomness että Dynamic Targeting pois päältä. Nämä valinnat mahdollistavat deterministisen tarkastelun, joka on mahdollista toistaa pienemmällä RCS:llä. Jos valinnat jätetään päälle, skenaariota toistettaessa hävittäjät käyttäytyvät todennä-

köisesti eri tavalla, jolloin skenaarioiden vertailu ei ole mahdollista. Sinisten taitotaso määritetään tasolle 4. Tämä antaa sinisille mahdollisuuden puolustautua tilanteessa, jossa punaiset hävittäjät kykenevät pääsemään uhkaavaan asemaan. Sinisen reagointietäisyys valitaan sellaiseksi, että sininen kykenee vaikuttamaan aseistuksellaan punaiseen ennen tällaista etäisyyttä. Etäisyyden määrittämiseksi käytetään asiantuntijaa sekä aikaisempaa tutkimusta. Hävittäjien määrä ja osapuolten keskinäinen voimasuhde voidaan valita vapaasti kuitenkin siten, että kokonaismäärä on enimmillään 60.

BigTacissä sinisten toimintatapoja on kehitettävä tutkimuksen aikana. Tähän käytetään asiantuntijoina operaattoreita. Operaattori arvioi simulaation aloitusasetelmaa hänen aikaisempien kokemusten perusteella. Kun aloitusasetelma on saatu valmiiksi, käynnistetään simulaatio. Operaattorin tulee kiinnittää erityistä huomiota sinisten hävittäjien taktiikkaan. Tavoitteena on löytää sopivat toimintatavat kokeilemalla. Sinisten toimintatavat muutetaan vastaamaan operaattorin esityksiä kuitenkin siten, että tutkimuksen tavoite ei muutu. Tällaisia toistuvaa kehittämistä jatketaan, kunnes sinisten toimintatavat ovat asiantuntijan arvion mukaan hyväksyttäviä.

## 4.2 Tehtävärakenteen osatekijöiden määrittäminen

Tehtävärakenteen osatekijät valitaan seuraavasti: lentoturvallisuudesta tarkastellaan lentoarvojen rikkomisten ja maahan törmäämisten lukumäärää, selviytymisestä tarkastellaan alasmuuttujen sinisten hävittäjien lukumäärää, tehtävän toteutumisesta tarkastellaan alasmuuttujen punaisten lukumäärää ja ilmaoperaation tehtävän suorittamista riippuen tehtävän luonteesta. Selviytymisen osatekijän tarkastelu on suoritettava vain punaisten hävittäjien tukien avulla suoritettavien torjuntajoukkojen osalta. Punaisten torjunnat muilla menetelmillä pitää rajata tarkastelun ulkopuolelle, mikä on mahdollista BigTacin tapahtumalokin avulla.

Kun otetaan mukaan mitattavissa olevia osatekijöitä, voidaan tarkastella häivetekniikan laajempia vaikutuksia. Kun kokeiden tulokset otetaan vertailtavaksi, määritetään osatekijöille painokertoimet ja lisätään yhdeksi vertailtavaksi arvoksi häivetekniikan hinta, voidaan ilmaoperaatiolle määrittää kustannus. Käytetään asiantuntija-apua häivetekniikan hinnan määrittämiseksi. Asiantuntija valitaan ilmavoimien esikunnan hankeosastolta, jolla on hyvä näkemys tulevien hankintojen kustannuksista. Tällä tavoin kyetään arvioimaan millainen vaikutus häivetekniikalla on rahallisesti. Yksinkertaistettuna tämä tarkoittaa sitä, että omien tappioiden välttämiseksi voidaan käyttää rahaa tietty määrä. Yhdelle hävittäjälle voidaan laskea

hinta millä häivetekninen ominaisuus kannattaa hankkia. Tällaisella kustannustehokkuustarkastelulla tulevan hävittäjän hankinnassa voidaan vertailla hävittäjiä, joissa on häiveteknisiä ominaisuuksia ja hävittäjiä, joissa näitä ominaisuuksia ei ole.

Edellä on esitetty ohjeet siitä, miten BigTac-simulointia voidaan käyttää ilmasotataktiikan tutkimisen työkaluna skenaarioissa käytettäessä häivetekniikkaa. Tämän tutkielman tulosten perusteella näitä ohjeita voidaan käyttää myös muulla, jäljessä esitetyllä tavalla.



## 5 POHDINTA

Tutkielmassa valittiin taktiikan näkökulma häivetekniikan tutkimuksen perustaksi. Tutkimusmetodiksi valittiin simulointi, jonka toiminnallisuuksia tutkittiin kahdella kokeella. Tulosten perusteella todettiin, että BigTac:ä voidaan käyttää häivetekniikan vaikutusten tutkimiseen. Luotiin ilmataisteluskenaario, josta mitattiin tehtävärakenteen osatekijöiden arvoja. Arvoja vertailtiin ja näiden perusteella luotiin ohjeistus.

Skenaarion tuloksia voidaan tarkastella myös toisesta näkökulmasta. Koska RCS:n malliksi valittiin pistemäinen RCS, eivät kaikki ilmataistelun toiminnallisuudet esiinny tuloksissa, koska todellisuudessa RCS vaihtelee merkittävästi riippuen monesta eri tekijästä. Näitä ovat muun muassa kohteen koko, muoto, materiaalit (etenkin pintamateriaalit), tutka-antennin sijainti suhteessa kohteeseen, kohteen asento suhteessa uhkan tutkaan, tutkasäteilyn taajuus ja tutka-antennin polarisaatio. Toiminnallisuuksina ovat esimerkiksi ilmataistelugeometrioiden hyväksikäyttö suhteessa vihollisten hävittäjiin. Muutettaessa geometrioita myös RCS muuttuu ja uhkan tutka voi havaita hävittäjän huomattavasti aikaisemmin kuin mitä se tekisi käytettäessä geometriaa, joka minimoi RCS:n. Tarkat RCS-arvot eri kulmilta mahdollistavat tarkemman sekä moniulotteisemman häivetekniikan vaikutusten tutkimismahdollisuuden. Tämä vaatii merkittävän määrän resursseja ja parhaimmassakin tapauksessa uuden teknologian häivetekniset tiedot perustuvat kuitenkin vain arvioihin. Näillä arvioilla voidaan todennäköisesti saavuttaa hyviä tuloksia niistä toiminnallisuuksista mihin tämän tutkielman tuloksilla ei päästä. Täten on suositeltavaa suorittaa ensin tämän tutkielman mukainen yksinkertaistettu tarkastelu, jonka jälkeen käytetään mahdollisimman tarkkoja RCS-arvoja.

Tehtävärakenteen osatekijöiden valinta voidaan tehdä myös muulla tavalla. Esimerkiksi Sormusen ja Eskelisen CMEP-matriisin laajentaminen ilmasotataktiikkaan antaisi moniulotteisemman kvantitatiivisen analyysityökalun häivetekniikan hyötyjen tarkasteluun. Sellaisenaan CMEP-matriisi ei ole käyttökelpoinen johtuen maasodan ja ilmasodan luonteiden eroista. Tullevien tutkijoiden tavoitteena on luoda CMEP-matriisi ilmasotataktiikan analyysiä varten. Jos tällainen ilmasotataktiikan CMEP-matriisi kyetään luomaan, avaa tämä valtavasti mahdollisuuksia avartaa ja laajentaa taktiikan tutkimusta ilmavoimien joukko-osastoissa. Käytettäessä tällaista matriisia kaikissa ilmavoimien tutkimuksissa ja taktiikan kehittämistilaisuuksissa, voidaan kaikkien joukko-osastojen käyttämiä tai tutkimia taktiikoita vertailla luotettavasti. Matriisi myös mahdollistaa jäsennellyn, mitattavissa olevan, tilastoitavan ja vertailukelpoisen työkalun ilmaoperaatioanalyysiä varten. Perinteisesti ilmaoperaatioanalyysissä käytetään tässä

tutkielmassa käytetyn tehtävärakenteen osatekijöitä ilmasodankäynnin etenemisen arviointiin. Ilmasodan CMEP-matriisilla voitaisiin analysoida myös käytettyä taktiikkaa syvällisemmin ja mahdollisesti muuttaa sitä ilmasodan suunnan muuttamiseksi.

Tutkielman tulosten perusteella voidaan todeta, että kahden ensimmäisen kokeen tulokset ovat aikaisemman tutkitun tiedon kanssa samankaltaisia ja odotettuja. Koska simulointi oli luonteeltaan deterministinen, voidaan sanoa tulosten olevan luotettavia. Skenaariotarkastelussa deterministisyys ei riitä vertailtavissa olevien tulosten saamiseksi. Varsinkin sinisten hävittäjien toimintatavat tulee muokata operaattorin avulla. Kuten aikaisemmin on todettu, vasta tällaisella menettelyllä taktiikan yhdistäminen häivetekniseen tarkasteluun voi tuottaa käyttökelpoisia tuloksia. Näillä menettelyillä kyetään luomaan perusta häivetekniselle kustannustehokkuustarkastelulle. Tulokset pätevät kuitenkin vain käytetyn uhkajärjestelmän tutkan sähkömagneettisen spektrin alueen tarkastelussa. Haluttaessa tarkastella toista uhkajärjestelmää, on kokeet suoritettava uudelleen uusilla järjestelmillä.

Tämän tutkielman ohjeistusta voidaan käyttää ilmavoimien joukko-osastoissa taktiikan tutkimisessa sekä kehittämisessä. Taktiikan ymmärtäminen myös kvantitatiivisesti analysoitavissa olevana mekanismina voi antaa mahdollisuuden tilastoida harjoittelussa käytettäviä taktiikoita. Vertailemalla eri taktiikoiden tuloksia voidaan löytää hyviä ja huonoja taktiikoita niiden jatkokehittämistä varten. Lisäksi joukko-osastoissa voidaan käyttää tämän tutkielman ohjeistusta tutkittaessa vastustajan uusien suorituskykyjen vaikutuksia ilmasodan arvioituihin tuloksiin. Tämä tarkoittaa sitä, että taktiikan kehittäjä voi tutkia vihollisen häiveteknologialla varustettujen hävittäjien vaikutuksista omaan toimintaan.

On mahdollista, että tulevat tutkijat voivat käyttää tämän tutkielman ohjeistusta myös omien häiveteknologialla varustettujen hävittäjien käyttöperiaatteiden tutkimiseksi. Häivetekniikan mukanaan tuomat tekniset mahdollisuudet voidaan ottaa tehokkaasti käyttöön vain niiden, jopa ilkiömäisenä hyväksikäyttönä (taktiikkana). Juuri taktiikan kehittäjä voi vaikuttaa tulevissa operaatioissa ohjaajien selviytymismahdollisuuksiin niillä taktisilla valinnoilla mitä häivetekniikka voi ohjaajalle antaa. Koska häivetekniikka ja ilmasotataktiikka liittyvät tiiviisti toisiinsa, näiden tutkiminen samanaikaisesti voi tuottaa uusia ja parempia tutkimustuloksia<sup>24</sup>. Häivetekniikka voi antaa hävittäjäohjaajalle mahdollisuuden käyttää erilaisia päätöksenteo-koetäisyyksiä, joiden perusteella ilmasotataktiikka voi olla hyvinkin erilainen.

---

<sup>24</sup> Norsell (2004), s. 11.

Jatkotutkimuksiksi esitetään:

- ilmasotataktiikan määrittely mitattavissa olevin suurein, joka perustuu tässä tutkielmassa käytettyyn tehtävärakenteen osajärjestelmiin sekä CMEP-matriisin periaatteisiin – eli ilmasotataktiikan CMEP-matriisi
- tämän tutkielman koejärjestelyjen toistaminen toisilla sähkömagneettisen spektrin alueilla toimivilla uhkajärjestelmillä.

## LÄHTEET

### 1 TUTKIMUKSET JA OPINNÄYTTEET

Norsell, Martin: *Aircraft Trajectory Optimization with Tactical Constraints*, Doctoral dissertation, Kungliga Tekniska Högskolan, Tukholma, Ruotsi, 2004.

### 2 KIRJALLISUUS

Feuchter, Christopher A.: *Air force analyst's handbook: On understanding the nature of analysis*, Office of Aerospace Studies, Kirtland Air Force Base, Yhdysvallat, 2000.

Grant, Rebecca: *The Radar Game*, Mitchell Institute Press, Washington D.C., USA, 2010.

Skolnik, Merrill I.: *Introduction to radar*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, USA, 1962.

Toomay, John, Hannen, Paul J.: *Radar Principles for the Non-Specialist*, SciTech Publishing, Herndon, USA, 2004.

### 3 ARTIKKELIT

Epps, Kenneth: *Why Joint Strike Fighter aircraft? Program costs rise and benefits carry risks*, Ploughshares Briefing 10/3, Project Ploughshares, Ontario, Kanada, 2010.

Heinze, Clinton, Goss, Simon, Josefsson, Torgny, Bennett, Kerry, Waugh, Sam, Lloyd, Ian, Murray, Graeme, Oldfield, John, Interchanging agents and humans in military simulation. *AI Magazine* 23(2), toimittanut Steve Chien, Haym Hirsh, American Association for Artificial Intelligence, Palo Alto, Yhdysvallat, 2002.

Hill, Raymond R., Miller, John O., McIntyre, Gregory A.: Applications of discrete event simulation modeling to military problems, Simulation Conference, 2001. *Proceedings of the Winter Simulation Conference Vol. 1*, toimittanut B. A. Peters, J. S. Smith, D. J. Medeiros, M. W. Rohrer, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Washington DC, Yhdysvallat, 2001.

Liu, Hongfu, Chen, Jing, Shen, Lincheng, Chen, Shaofei: Low observability trajectory planning for stealth aircraft to evade radars tracking, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, SAGE Publications Ltd, Lontoo, UK, 2013.

Page, Ernest H., Smith, Roger: Introduction to military training simulation: a guide for discrete event simulationists, *Winter Simulation Conference Proceedings*, toimittanut D. J. Medeiros, Edward F. Watson, John S. Carson, Mani S. Manivannan, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Washington DC, Yhdysvallat, 1998.

Schulte, Axel: Mission Management and Crew Assistance for Military Aircraft – Cognitive Concepts and Prototype Evaluation, luentosarja LS 227, *Tactical Decision Aids and Situational Awareness*, The Research and Technology Organisation (RTO) of NATO, Hull, Kanada, 2001.

Sormunen, Jari, Eskelinen, Harri: Utilizing Bézier surface pattern recognition for analyzing military tactics, *Proceedings of the Finnish Operations Research Society 40th Anniversary Workshop – FORS40*, toimittanut Collan, Mikael, Hämäläinen, Jari, Luukka, Pasi, elektroninen julkaisu, Lappeenranta, Suomi, 2013.

Thomas, Stephen E., and Martin, Cindy, Using virtual simulation for tactics development for constructive simulation, *American Institute of Aeronautics & Astronautics Meeting Papers*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Yhdysvallat, 2000.

Younossi, Obaid, Stem, David E., Lorell, Mark A., Lussieret, Frances M.: *Lessons Learned from the F/A-22 and F/A-18E/F Development Programs*, Deputy Chief of Plans and Operations (Air Force) Washington DC Directorate of Plans, Rand Corporation, Santa Monica, Yhdysvallat, 2005.

Zikidis, Konstantinos, Alexios Skondras, and Charisios Tokas: Low Observable Principles, Stealth Aircraft and Anti-Stealth Technologies, *Journal of Computations & Modelling 4.1*, International Scientific Press, Lontoo, UK, 2014.